



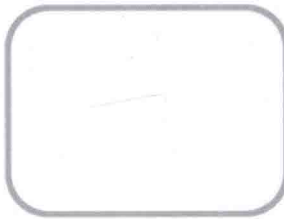
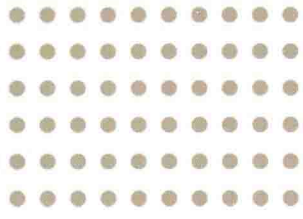
普通高等教育“十二五”规划教材

# 航空

## 工程材料与失效分析

Aeronautical Materials and Failure Analysis

原梅妮 主编



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

普通高等教育“十二五”规划教材

# 航空工程材料与失效分析

原梅妮 主编

中国石化出版社

## 内 容 提 要

本书全面系统地介绍了航空工程材料基础知识和各种航空材料(金属材料、非金属材料、复合材料、功能材料),并专门介绍了航空新材料(超塑性合金、快速凝固合金、非晶合金、纳米材料、空心微球)、航空材料先进加工技术(航空钣金零件成型方法、电火花加工和电解加工、超声波加工和激光加工、电子束加工)以及航空材料失效分析。

本书可作为高等院校航空航天、机械等专业学生的教材,也可供航空材料研究、航空产品设计、维修人员参考阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

航空工程材料与失效分析 / 原梅妮主编. —北京:  
中国石化出版社, 2014. 5  
普通高等教育“十二五”规划教材  
ISBN 978 - 7 - 5114 - 2786 - 1

I. ①航… II. ①原… III. ①航空材料 - 高等学校 -  
教材 IV. ①V25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 077031 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

### 中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

787 × 1092 毫米 16 开本 17 印张 422 千字

2014 年 5 月第 1 版 2014 年 5 月第 1 次印刷

定价: 48.00 元

# 前 言

本书系航空宇航特色系列教材，结合航空宇航设计和制造专业对航空工程材料与失效分析需求而编写。围绕航空材料及航空构件失效分析，本书内容包括三大模块：(1)航空材料基本理论：航空金属材料、非金属组织、结构和力学性能；(2)常用航空材料及先进制造技术：常用的航空金属材料、功能材料、复合材料以及航空钣金零件成型方法、电火花加工和电解加工、超声波加工和激光加工、电子束加工技术；(3)航空零件失效与预防：系统地介绍了各种航空材料与航空飞行器失效形式、机理、预防措施并列举典型案例。本书在编写过程中充分突出了航空材料特点，在内容安排上尽量选择与航空宇航制造和设计相关的题材。适用于高等学校航空航天专业、机械专业本科生和研究生的材料科学教材，也可作为航空材料研究、航空产品设计、维修人员及材料工业部门读者的参考书籍，对科研和生产有一定的参考价值。

本书第2、6、7、9章由中北大学原梅妮编写，第3章由河南理工大学李妙玲编写，第4章由运城学院弓巧娟编写，第5章由李彩霞编写，第8章由太原理工大学闫少波编写，第1、10章由杜瑞奎编写，第11章由王文虎编写，全书由原梅妮统稿。本书在编写过程中参考了很多文献资料，主要文献列于书后，在此谨向所有参考文献作者表示感谢。另外，郎贤忠、李超、张明等研究生承担了部分文稿录入工作，中国石化出版社对本书出版也付出了辛勤的劳动，在此一并表示感谢。

本书编写受国家自然科学基金(51201155)、山西省自然科学基金(2012011019-1, 2012011007-1)资助。

# 目 录

第1章 绪论 .....	( 1 )
1.1 航空及航空材料 .....	( 1 )
1.1.1 航空和航空材料概念 .....	( 1 )
1.1.2 航空材料分类 .....	( 1 )
1.1.3 航空材料性能 .....	( 5 )
1.1.4 航空材料特殊性 .....	( 6 )
1.2 航空材料发展与应用 .....	( 7 )
1.2.1 飞机结构材料演变 .....	( 7 )
1.2.2 航空发动机材料演变 .....	( 9 )
1.2.3 航空材料发展特点及关键技术 .....	( 10 )
1.2.4 国内航空材料发展现状 .....	( 11 )
1.2.5 航空材料发展方向 .....	( 12 )
习题与思考题 .....	( 13 )
第2章 航空材料结构、组织和性能 .....	( 14 )
2.1 金属材料 .....	( 14 )
2.1.1 金属晶体结构 .....	( 14 )
2.1.2 金属组织和缺陷 .....	( 16 )
2.1.3 金属结晶 .....	( 18 )
2.1.4 合金结构和结晶 .....	( 20 )
2.2 高分子材料 .....	( 22 )
2.2.1 高分子材料基本概念 .....	( 22 )
2.2.2 高分子化合物结构 .....	( 23 )
2.2.3 高分子化合物的力学状态 .....	( 24 )
2.2.4 高分子材料力学、物化性能特点 .....	( 25 )
2.3 陶瓷材料 .....	( 26 )
2.3.1 陶瓷材料概念与分类 .....	( 26 )
2.3.2 陶瓷材料结构 .....	( 27 )
2.3.3 陶瓷材料力学、物化性能特点 .....	( 28 )
2.3.4 陶瓷材料研究和应用 .....	( 29 )
2.4 航空材料机械性能 .....	( 29 )
2.4.1 静载荷下材料力学性能 .....	( 30 )
2.4.2 动载荷下材料力学性能 .....	( 33 )
2.4.3 高温下材料力学性能 .....	( 34 )
2.5 航空材料工艺性能 .....	( 35 )
2.5.1 铸造性能 .....	( 35 )

2.5.2	锻造性能 .....	( 37 )
2.5.3	焊接性能 .....	( 43 )
2.5.4	热处理性能 .....	( 43 )
	习题与思考题 .....	( 45 )
<b>第3章</b>	<b>轻合金及超高强度钢 .....</b>	<b>( 46 )</b>
3.1	铝及铝合金 .....	( 46 )
3.1.1	纯铝 .....	( 46 )
3.1.2	铝合金 .....	( 47 )
3.1.3	国内外常用航空铝合金 .....	( 50 )
3.1.4	铝合金热处理 .....	( 53 )
3.2	钛及钛合金 .....	( 54 )
3.2.1	纯钛 .....	( 54 )
3.2.2	钛合金 .....	( 55 )
3.2.3	钛合金热处理工艺 .....	( 56 )
3.2.4	钛合金在航空领域的应用 .....	( 57 )
3.3	镁及镁合金 .....	( 58 )
3.3.1	纯镁 .....	( 58 )
3.3.2	镁合金 .....	( 59 )
3.3.3	国内外常用的航空镁合金 .....	( 64 )
3.3.4	镁合金热处理工艺 .....	( 66 )
3.4	铜及铜合金 .....	( 67 )
3.4.1	纯铜 .....	( 67 )
3.4.2	铜合金 .....	( 67 )
3.4.3	黄铜、青铜及白铜 .....	( 68 )
3.4.4	铜合金应用 .....	( 72 )
3.5	超高强度钢 .....	( 73 )
3.5.1	超高强度钢的概念、特点和分类 .....	( 73 )
3.5.2	超高强度钢力学性能 .....	( 75 )
3.5.3	超高强度钢在航空航天中应用 .....	( 77 )
3.5.4	超高强度钢设计及发展前景 .....	( 79 )
	习题与思考题 .....	( 80 )
<b>第4章</b>	<b>高温结构金属材料 .....</b>	<b>( 81 )</b>
4.1	高温钛合金 .....	( 81 )
4.1.1	高温钛合金工作条件和成分 .....	( 81 )
4.1.2	铸造热强钛合金和阻燃钛合金 .....	( 83 )
4.1.3	高温钛合金在航空中应用 .....	( 85 )
4.1.4	新型航空高温钛合金发展思路和关键技术 .....	( 85 )
4.2	镍基高温合金 .....	( 87 )
4.2.1	镍基高温合金成分 .....	( 87 )
4.2.2	镍基高温合金分类 .....	( 88 )

4.2.3	镍基高温合金的航空应用	( 89 )
4.2.4	镍基高温合金制备技术	( 90 )
4.3	金属间化合物	( 91 )
4.3.1	金属间化合物结构	( 92 )
4.3.2	常用航空金属间化合物	( 92 )
4.3.3	航空金属间化合物先进制备技术	( 94 )
4.4	难熔金属及其合金	( 96 )
4.4.1	难熔金属的性质	( 96 )
4.4.2	航空工业常用难熔金属及其合金	( 97 )
4.4.3	难熔金属强化方法	( 100 )
	习题与思考题	( 101 )
<b>第 5 章</b>	<b>非金属材料及功能材料</b>	( 102 )
5.1	塑料	( 102 )
5.1.1	塑料组成和分类	( 102 )
5.1.2	常用塑料	( 106 )
5.1.3	航空塑料选材原则及应用	( 107 )
5.2	橡胶和合成纤维	( 107 )
5.2.1	橡胶组成和分类	( 107 )
5.2.2	橡胶性能特点	( 109 )
5.2.3	航空工业常用橡胶材料	( 110 )
5.2.4	合成纤维特点和分类	( 111 )
5.2.5	合成纤维在航空工业中应用	( 112 )
5.3	胶黏剂及涂料	( 112 )
5.3.1	胶黏剂组成和特点	( 113 )
5.3.2	航空工业常用胶黏剂	( 114 )
5.3.3	涂料组成和作用	( 115 )
5.3.4	航空工业常用涂料	( 117 )
5.4	功能材料	( 118 )
5.4.1	功能材料概述	( 118 )
5.4.2	航空微电子材料	( 119 )
5.4.3	航空光电子材料	( 121 )
5.4.4	航空功能陶瓷	( 122 )
5.4.5	航空隐身材料	( 123 )
	习题与思考题	( 125 )
<b>第 6 章</b>	<b>复合材料</b>	( 126 )
6.1	复合材料简介	( 126 )
6.1.1	复合材料发展演化	( 126 )
6.1.2	复合材料概念和分类	( 127 )
6.1.3	复合材料性能和特点	( 131 )
6.1.4	复合材料强化机理	( 132 )

6.2 金属基复合材料 .....	(133)
6.2.1 金属基复合材料概念、分类 .....	(133)
6.2.2 金属基复合材料特点 .....	(134)
6.2.3 金属基复合材料微观结构 .....	(135)
6.2.4 常用的航空金属基复合材料 .....	(136)
6.3 树脂基复合材料 .....	(138)
6.3.1 树脂基复合材料概念、分类和特点 .....	(138)
6.3.2 树脂基复合材料性能 .....	(139)
6.3.3 树脂基复合材料制备技术 .....	(141)
6.3.4 常用的航空树脂基复合材料 .....	(143)
6.4 陶瓷基复合材料 .....	(144)
6.4.1 陶瓷基复合材料概念、分类 .....	(144)
6.4.2 陶瓷基复合材料微观结构和性能 .....	(147)
6.4.3 陶瓷基复合材料增韧机理 .....	(148)
6.4.4 常用航空陶瓷基复合材料 .....	(149)
习题与思考题 .....	(150)
<b>第7章 航空新材料</b> .....	<b>(151)</b>
7.1 超塑性合金 .....	(151)
7.1.1 超塑性合金概念、特点 .....	(151)
7.1.2 常用航空超塑性合金 .....	(153)
7.1.3 航空超塑性合金应用价值及前景 .....	(154)
7.2 快速凝固合金 .....	(155)
7.2.1 快速凝固技术 .....	(155)
7.2.2 快速凝固合金组织特征 .....	(156)
7.2.3 快速凝固合金方法 .....	(156)
7.2.4 航空工业常用的快速凝固合金 .....	(157)
7.3 非晶合金 .....	(158)
7.3.1 非晶态和晶态材料 .....	(158)
7.3.2 非晶合金结构、性能及形成机制 .....	(160)
7.3.3 非晶合金结构弛豫和晶化现象 .....	(161)
7.3.4 非晶合金和纳晶合金材料 .....	(162)
7.3.5 非晶合金制备及应用 .....	(163)
7.4 纳米材料 .....	(164)
7.4.1 纳米材料特性及制备技术 .....	(164)
7.4.2 纳米复合材料结构和特点 .....	(166)
7.4.3 纳米复合涂层在航空航天工业中应用 .....	(169)
7.4.4 纳米技术在航空航天工业中应用 .....	(169)
7.5 空心微球 .....	(170)
7.5.1 空心微球特性 .....	(170)
7.5.2 空心微球制备技术 .....	(172)



7.5.3 空心微球在航空和宇航材料中应用 .....	(173)
习题与思考题 .....	(175)
<b>第8章 航空材料特种加工技术 .....</b>	<b>(176)</b>
8.1 航空钣金零件成型方法 .....	(176)
8.1.1 航空钣金零件分类 .....	(176)
8.1.2 航空钣金零件成型方法 .....	(177)
8.1.3 航空钣金零件成型计算机模拟 .....	(181)
8.1.4 航空钣金成型中的毛料展开 .....	(183)
8.2 航空材料电火花加工和电解加工 .....	(184)
8.2.1 电火花加工特点、原理及分类 .....	(184)
8.2.2 电火花加工技术在航空制造中应用和发展 .....	(185)
8.2.3 电解加工特点和工艺 .....	(186)
8.2.4 电解加工在航空制造中应用和发展 .....	(188)
8.3 航空材料超声波加工 .....	(189)
8.3.1 超声波加工技术、特点及加工原理 .....	(189)
8.3.2 超声波加工工艺及设备 .....	(191)
8.3.3 微细超声波加工及超精密加工制约因素 .....	(193)
8.3.4 超声加工技术在航空工业中应用 .....	(194)
8.4 航空材料电子束加工 .....	(194)
8.4.1 电子束加工原理、特点与分类 .....	(194)
8.4.2 电子束加工装置 .....	(195)
8.4.3 电子束焊接、刻蚀、打孔及熔炼 .....	(196)
8.4.4 电子束加工技术在航空中应用 .....	(197)
习题与思考题 .....	(198)
<b>第9章 失效分析基础知识 .....</b>	<b>(199)</b>
9.1 失效与失效分析 .....	(199)
9.1.1 失效 .....	(199)
9.1.2 失效分析 .....	(203)
9.1.3 失效分析工作内容 .....	(204)
9.2 失效分析思想方法和程序 .....	(206)
9.2.1 失效分析思路 .....	(206)
9.2.2 失效分析实施步骤和程序 .....	(208)
9.2.3 常用失效分析思路 .....	(209)
9.3 断口分析技术 .....	(210)
9.3.1 断口及断口分析 .....	(210)
9.3.2 断口处理方法及分析依据 .....	(211)
9.3.3 断口宏观分析 .....	(212)
9.3.4 断口微观分析 .....	(216)
9.4 裂纹分析技术 .....	(221)
9.4.1 裂纹分析思路 .....	(221)

9.4.2	裂纹综合诊断 .....	(224)
9.4.3	裂纹的无损检测技术 .....	(225)
	习题与思考题 .....	(225)
<b>第10章</b>	<b>断裂失效分析 .....</b>	<b>(226)</b>
10.1	断裂 .....	(226)
10.1.1	断裂与断裂失效 .....	(226)
10.1.2	金属材料断裂类型和特征 .....	(226)
10.1.3	材料韧性、冲击韧性和应力强度因子 .....	(228)
10.2	静载荷断裂失效 .....	(230)
10.2.1	过载断裂定义 .....	(230)
10.2.2	过载失效断口特征 .....	(231)
10.2.3	影响静载荷断裂失效的因素 .....	(232)
10.2.4	扭转和弯曲过载断口特征 .....	(234)
10.3	疲劳断裂 .....	(235)
10.3.1	交变应力和疲劳断裂失效 .....	(235)
10.3.2	疲劳断裂失效基本形式和特征 .....	(236)
10.3.3	疲劳断口形貌 .....	(238)
10.3.4	疲劳断裂失效类型与鉴别 .....	(241)
10.4	应力腐蚀断裂 .....	(243)
10.4.1	应力腐蚀定义和条件 .....	(244)
10.4.2	应力腐蚀机理、形貌及特征 .....	(246)
10.5	磨损与腐蚀 .....	(247)
10.5.1	磨损与磨损失效 .....	(247)
10.5.2	磨损失效类型 .....	(247)
10.5.3	腐蚀 .....	(248)
10.5.4	腐蚀失效基本类型 .....	(248)
	习题与思考题 .....	(250)
<b>第11章</b>	<b>航空飞行器失效分析 .....</b>	<b>(251)</b>
11.1	航空飞行器 .....	(251)
11.1.1	航空飞行器概念与分类 .....	(251)
11.1.2	航空飞行器构造 .....	(252)
11.2	航空飞行器失效类型与机理 .....	(254)
11.2.1	航空飞行器常见失效形式与影响因素 .....	(254)
11.2.2	航空飞行器失效模式 .....	(258)
11.2.3	飞机结构失效分析案例 .....	(259)
	习题与思考题 .....	(261)
<b>参考文献</b>	.....	<b>(262)</b>

# 第 1 章 绪论

“一代材料，一代飞行器”是航空工业发展的生动写照。近百年来，航空材料推动着航空飞行器不断发展和进步，作为航空飞行器的典型代表——飞机，其机体材料经历了木布结构、铝钢结构、铝钛钢结构、铝钛钢复合材料结构 4 个发展阶段，目前正进入以复合材料结构为主的第 5 个发展阶段。航空材料始终支持和引领着航空领域的发展，是航空飞行器发展进步最基础、最原始和最本质的驱动力。

## 1.1 航空及航空材料

航空和航空材料是 21 世纪最活跃和最具影响力的科学技术领域，该领域取得的重要成就标志着人类文明的发展水平，也体现着一个国家的综合国力及科学技术水平。

### 1.1.1 航空和航空材料概念

#### 1.1.1.1 航空

航空是指飞行器在大气层中的航行活动，同时也泛指开发研究航空器所涉及的各种技术，如飞机制造、发展和设计等。

自古以来人类就渴望像鸟儿一样翱翔天空，这些可从古代的传说中得知，例如中国的“嫦娥奔月”传说，但直到 18 世纪后期载人热气球在欧洲升空后才首度实现。到了 19 世纪，人们制造出不用发动机的滑翔机来飞行；20 世纪初随着工业革命带来的科技进步，人类的航空事业得以迅速发展。1903 年美国莱特兄弟发明了第一架重于空气、带有动力、受控并可持续滞空的飞机，并成功试飞，开启了现代航空新纪元。

#### 1.1.1.2 航空材料

航空材料是制造航空器、航空发动机和机载设备等所用各类材料的总称。

航空材料是研制生产航空产品的物质保障，也是使航空产品达到人们期望的性能、使用寿命与可靠性的技术基础。由于航空材料的基础地位，以及其对航空产品贡献率的不断提高，航空材料与航空发动机、信息技术成为并列的三大航空关键技术之一，也是对航空产品发展有重要影响的六项技术之一。美国空军在《2025 年航空技术发展预测报告》中指出，在全部 43 项航空技术中，航空材料重要性位居第 2。此外，航空先进材料技术还被列为美国国防四大科技（分别为信息技术、材料技术、传感器技术和经济可承受性技术）优选项目之一，是其他三项技术的物质基础及重要组成部分。

### 1.1.2 航空材料分类

航空材料分类方法有多种，根据所用航空材料化学成分不同分为金属与合金材料、有机非金属材料、无机非金属材料 and 复合材料；根据航空材料使用对象不同可分为机体材料、航空发动机材料等；根据航空材料使用功能分为结构材料和功能材料两大类。

### 1.1.2.1 根据航空材料化学成分

航空材料根据航空材料化学成分不同可分为金属与合金材料、有机非金属材料、无机非金属材料 and 复合材料。

#### 1. 金属材料

金属材料是由金属元素或者以金属元素为主体组成的具有金属特性的材料，是航空领域应用最为广泛的材料，对航天航空技术的发展起着至关重要的作用。目前航空用高性能金属材料主要包括：铝合金、钛合金、镁合金、钢、高温合金、粉末冶金合金等。

(1) 铝合金：20 世纪 30 年代以后，铝合金成为飞机材料的主流。世界上第一架张臂式全金属飞机是德国飞机设计师容克斯设计的 J-1“锡驴”，1915 年 12 月 12 日首次试飞，该机采用铝合金作为蒙皮和防护装甲。J-1 型飞机是最早的攻击机，机上安装有有机枪，载有少量炸弹，可低空对地面目标进行扫射轰炸。世界上第一架硬铝全金属旅客机 F-13 也是容克斯设计的，该机于 1919 年 6 月 15 日首次试飞，在国际民航史上占有重要地位。

铝合金具有比模量与比强度高、耐腐蚀性能和加工性能好、成本低廉等突出优点，在航空工业领域主要用作航空结构件的承载结构，包括舱体结构、承载壁板、飞机机身、机翼内的梁、仪器安装框架、燃料储箱等。Al-Li 已用于制作大力神运载火箭的液氧贮箱、管道、有效载荷转接器，F16 战斗机后隔框，“三角翼”火箭推进剂贮箱，航天飞机超轻贮箱及战略导弹弹头壳体。据美国宇航局研究，Al-Li 合金因具有更好的抗多向撞击性能，比复合材料更适合用于建造“猎户座”的乘员舱。Al-Li 合金的韧性比铝合金有明显提高。EPA 战斗机用超塑性成型 Al-Li 合金做起落架，质量减轻 20%，成本节约 45% 以上。

当前铝合金的发展方向是开发低内应力的厚板材料，且在制造工艺上大量采用厚板以实

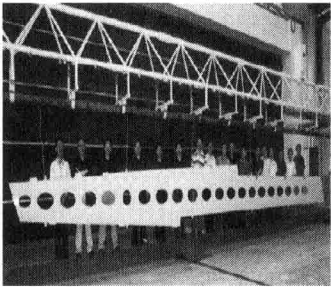


图 1-1 ARJ21 飞机大型铝合金机翼整体壁板

现整体结构部件成型，来代替以前用很多零件装配的部件(图 1-1)。广泛采用大型整体壁板结构已经成为一代飞机提高结构效率、减少零件数量、降低成本和缩短研制周期的重要手段。如波音 B747 飞机采用整体带筋壁板后，零件数量从 129 个减少到 7 个，成本降低了 25%，而裂纹扩展寿命和残余强度均提高了 3 倍。

(2) 钛合金：钛是 20 世纪 50 年代发展起来的一种重要的结构金属，与铝、镁、钢等金属材料相比，钛合金具有比强度高、抗腐蚀性能好、抗疲劳性能良好、热导率和线膨胀系数小等优点，可以在 350~450℃ 以下长期使用，低温可使用到 -196℃。

20 世纪 50 年代，美国首次将钛合金用在 F-84 轰炸机上作后机身隔热板、导风罩、机尾罩等非承力构件。进入 60 年代，飞机上的襟翼滑轨、承力隔框、中翼盒形梁、起落架梁等主要承力结构件也陆续采用了钛合金材料制造。自 70 年代起，民用飞机也开始大量使用钛合金，如波音 B747 客机的钛合金用量达 3640kg 以上。在马赫数小于 2.5 的飞机上，用钛合金来代替钢，可以减轻结构质量。例如美国 SR-71 高空高速侦察机(飞行马赫数为 3，飞行高度 26212m)，钛合金用量占飞机结构质量的 93%，号称“全钛”飞机。近年来，航空工业对高强度、低密度材料的需求日益迫切，使得钛合金材料的应用从战斗机拓展到大型军用轰炸机和运输机。钛合金材料的应用水平已成为衡量飞机先进性的重要标志之一。在美国战斗机的更新换代中，钛合金和复合材料的使用比例不断上升，第四代战斗机 F22 所使用材料中 41% 为钛合金，其中发动机的叶轮、盘、叶片、机匣、燃烧室筒体和尾喷管等均为钛合

金属材料制造。F119 发动机用钛量为 39%。阿波罗宇宙飞船双人舱及密闭舱翼梁及肋由 Ti-5Al-2.5Sn 合金制造，衬里则由纯钛制造；阿波罗火箭用的储压器、后喷嘴由具有低含氧量的 Ti-6Al-4V 合金板组成。Ti-6Al-4V 合金也已广泛用于上升段火箭发动机壳体。

20 世纪 70 年代，钛合金在航空发动机中主要用于制造压气机部件，如风扇、压气机盘和叶片、压气机机匣、中介机匣、轴承壳体等，其用量一般占到结构总重的 20%~30%。当航空发动机的推重比从 4~6 提高到 8~10，压气机出口温度相应地从 200~300℃ 升高到 500~600℃ 时，原来用铝合金制造的低压压气机盘和叶片就必须改用钛合金，或用钛合金代替不锈钢制造高压压气机盘和叶片，以减轻结构质量。

航空航天用钛合金的当前发展重点是多用途和多品种化。为满足高推重比发动机研制的需要，开展了高温、高强度合金及其他功能合金的研究，如高温钛合金和钛-铝金属间化合物(最高使用温度可达 982℃)、高强度钛合金(抗拉强度在 1000MPa 以上)、阻燃钛合金(以解决航空发动机用钛合金材料的“钛燃烧”问题)等。图 1-2 为用阻燃钛合金 Ti40 制造的飞机发动机压气机机匣零件。

(3) 镁合金：镁合金是航空器、航天器和火箭导弹制造工业中使用的最轻金属结构材料。镁的密度为 1.74g/cm<sup>3</sup>，约为铝的 2/3，铁的 1/4，镁及镁合金还具有高比强度、高比刚度、好的减震能力、优良的导热性和导电性、良好的尺寸稳定性和电磁屏蔽性能(足以抵御短波辐射和高能粒子的轰击)等。镁合金的特点可满足于航空航天等高科技领域对轻质材料吸噪、减震、防辐射的要求，可大大改善飞行器的流体动力学性能和明显减轻结构质量，使其在航空领域具有广泛的应用前景，适用于飞机和其他航天器的轻质外壳、蒙皮、减震系统元件及其他低承力的零件。

镁合金在潮湿空气中容易氧化和腐蚀，因此使用零件前，表面需要经过化学处理或涂漆。镁合金具有较高的抗震能力，在受冲击载荷时能吸收较大的能量，还有良好的吸热性能，因而是制造飞机轮毂的理想材料。镁合金在汽油、煤油和润滑油中很稳定，适于制造发动机齿轮机匣、油泵和油管，又因在旋转和往复运动中产生的惯性力较小而被用来制造摇臂、襟翼、舱门和舵面等活动零件。民用机和军用飞机尤其是轰炸机广泛使用镁合金制品。例如，B-36 轰炸机的机身部分就使用了镁合金板材 635kg(图 1-3)、挤压件 90kg、铸件超过 200kg。镁合金也用于导弹和卫星上的一些部件，如中国“红旗”地空导弹的仪表舱、尾舱和发动机支架等都使用了镁合金。中国稀土资源丰富，已于 20 世纪 70 年代研制出加钎镁合金，提高了室温强度，能在 300℃ 下长期使用，已在航空航天工业中得到推广应用。



图 1-2 阻燃钛合金 Ti40 发动机压气机机匣零件

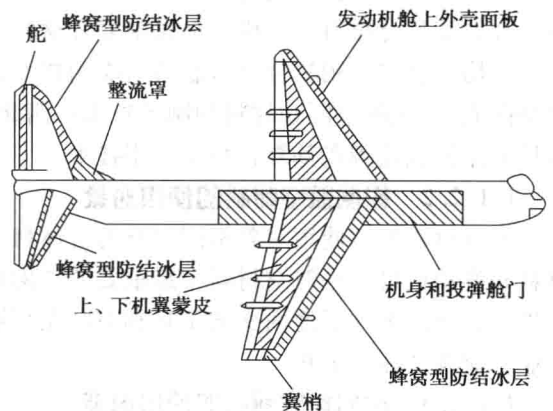


图 1-3 B-36 轰炸机(阴影部分为镁合金应用部位)

从 20 世纪 40 年代开始，镁合金首先在航空航天部门得到优先应用。在国外，B-36 重型轰炸机每架用 4086kg 镁合金薄板；喷气式歼击机“洛克希德 F-80”的机翼用镁板，使结构零件的数量从 47758 个减少到 16050 个；“德热来奈”飞船的起动火箭“大力神”曾使用 600kg 的变形镁合金；“季斯卡维列尔”卫星中使用了 675kg 的变形镁合金；直径约 1m 的“维热尔”火箭壳体是用镁合金挤压管材制造的。我国的歼击机、轰炸机、直升机、运输机、民用机、机载雷达、地空导弹、运载火箭、人造卫星、飞船上均选用了镁合金构件：一个型号的飞机最多选用了 300~400 项镁合金构件；一个零件的质量最重近 300kg；一个构件的最大尺寸达 2m 多。

(4) 钢：20 世纪初第一架载人上天飞机是用木材、布和钢制造的。1910~1925 年开始用钢管代替木材作机身骨架，用铝作蒙皮，制造全金属结构飞机。金属结构飞机提高了结构强度，改善了气动外形，使飞机性能得到提高。40 年代全金属结构飞机时速已超过 600km。50 年代末喷气式飞机速度已超过 2 倍音速，给飞机材料带来了热障问题。铝合金耐高温性能差，在 200℃ 时强度已下降到常温值的 1/2 左右，需要选用耐热性更好的钢。60 年代出现不锈钢占机体结构质量 69% 的 XB-70 轰炸机。苏联的米格 25 歼击机机翼蒙皮也采用钢。

(5) 金属间化合物：金属间化合物由于具有优于高温合金的耐热性、高的比强度、导热性和抗氧化性，以及具有优于陶瓷材料的韧性和良好的热加工性而受到广泛关注。已开发的 Ni3Al 商业牌号有美国的 IC-50、IC-218 和 IC-221M 等。IC-221M 合金已被选为替代 Ni 基高温合金制造柴油机增压器，以改善其疲劳寿命和降低成本。我国北京航空材料研究院自主开发的 Ni3Al 基的 IC-6 合金已应用于涡轮发动机，以提高发动机的工作温度。

## 2. 无机非金属材料

无机非金属材料是由硅酸盐、铝酸盐、硼酸盐、磷酸盐、锆酸盐等和氧化物、氮化物、碳化物、硼化物、硫化物、硅化物、卤化物等原料经过一定的工艺制备而成的。如玻璃、陶瓷等。

## 3. 高分子材料

由一种或者几种简单低分子化合物经聚合而成的相对分子质量很大的化合物。如透明材料、胶黏剂、橡胶及密封剂、涂料、工程塑料等。

## 4. 先进复合材料

由两种或者两种以上化学性质或者组织结构不同的材料组合而成。有聚合物基复合材料、金属基复合材料、无机非金属基复合材料、碳/碳复合材料等。2004 年度国家技术发明一等奖均为航空应用复合材料制备与应用技术，分别是中南大学黄伯云院士领导的团队研制的高性能炭/炭航空制动材料的制备技术；西北工业大学张立同院士领导的团队研制的耐高温长寿命抗氧化陶瓷基复合材料应用技术。

### 1.1.2.2 根据航空材料的使用对象

航空材料根据使用对象不同可分为机体材料、航空发动机材料等；通常航空飞行器机体材料和发动机材料是航空材料中最重要的结构材料，机体材料的进步不仅推动着飞行器本身的进步，而且带动了地面交通工具和空间飞行器的进步。发动机材料的发展同时推动着动力产业、能源产业的进步。

### 1.1.2.3 根据航空材料的使用功能

航空材料根据使用功能分为航空结构材料、航空非结构材料和航空功能材料三大类。



(1) 航空结构材料：主要用于制造飞行器各种结构部件，如飞机的机体、航天器的承力筒、发动机的壳体等，其作用主要是承受各种载荷，包括由自重造成的静态载荷和飞行中的各种动态载荷。飞机机体材料主要有铝合金、钛合金、镁合金等，多以板材、型材和管材的形式由冶金工厂提供。飞机上还有大量锻件和铸件，如机身加强框、机翼翼梁和加强筋多采用高强度铝合金和合金钢锻造毛坯，这些大型锻件要在  $300 \sim 700\text{MN}$  ( $3 \times 10^4 \sim 7 \times 10^4\text{t}$  力) 的巨型水压机上锻压成型。航空结构材料总的发展趋势是轻质化、高强度、高模量、耐高温、低成本。

(2) 航空非结构材料：量少而品种多，主要有玻璃、塑料、纺织品、橡胶、铝合金、镁合金、铜合金和不锈钢等。非结构材料主要用作舱内设施和装饰材料，液压、空调等系统用的附件和管道材料，天线罩和电磁材料，轮胎材料等。

(3) 航空功能材料：主要是指在光、声、电、磁、热等方面具有特殊功能的材料，主要包括机载设备的微电子和光电子材料、压电敏感元件材料、透波材料、吸波材料、红外敏感材料、激光晶体及低膨胀微晶玻璃等。20 世纪 90 年代的海湾战争是航空新型功能材料的大检阅，尤其是由吸波材料结合隐身结构设计实现隐身技术，使飞机的突防能力极大地提高。

### 1.1.3 航空材料性能

出于航空飞行及其安全性的考虑，航空材料应具有以下特点：

#### 1. 高比强度和高比刚度

航空材料的基本要求是：材质轻、强度高、刚度好。提高飞行器的比强度，就要降低其密度，减轻飞行器结构质量，减轻飞行器本身结构质量又意味着增加运载能力，提高机动性能，加大飞行距离或射程，减少燃油或推进剂的消耗。材料比刚度在航空系统中也是非常关键的参数，能影响某些部位的震动性能，比如飞机机翼。

比强度和比刚度是衡量航空航天材料力学性能优劣的重要参数：

$$\text{比强度} = \frac{\sigma}{\rho} \quad (1-1)$$

$$\text{比刚度} = \frac{E}{\rho} \quad (1-2)$$

式中， $\sigma$  为材料强度， $E$  为材料弹性模量， $\rho$  为材料密度。飞行器除了受静载荷的作用外还要经受由于起飞和降落、发动机振动、转动件的高速旋转、机动飞行和突风等因素产生的交变载荷，因此材料的疲劳性能也受到人们极大的重视。

#### 2. 优良的耐高低温性能

飞行器所经受的高温环境是由空气动力加热、发动机燃气以及太空中太阳的辐照造成的。航空器长时间在空气中飞行，有的飞行速度高达 3 倍音速，所使用的高温材料要具有良好的高温持久强度、蠕变强度、热疲劳强度，在空气和腐蚀介质中要有高的抗氧化性能和抗热腐蚀性能，并应具有在高温下长期工作的组织结构稳定性。火箭发动机燃气温度达  $3000^\circ\text{C}$  以上，喷射速度可达十余个马赫数，而且固体火箭燃气中还夹杂有固体粒子，弹道导弹头部在进入大气层时速度高达 20 个马赫数以上，温度高达上万摄氏度，有时还会受到粒子云的侵蚀，因此在航空技术领域中所涉及的高温环境往往同时包括高温高速气流和粒子的冲刷。在这种条件下需要利用材料所具有的熔解热、蒸发热、升华热、分解热、化合热以及高

温黏性等物理性能来设计高温耐烧蚀材料和发汗冷却材料以满足高温环境的要求。太阳辐照会造成在外层空间运行的卫星和飞船表面温度的交变，一般采用温控涂层和隔热材料来解决。低温环境的形成来自大自然和低温推进剂。飞机在同温层以亚音速飞行时表面温度会降到 $-50^{\circ}\text{C}$ 左右，极圈以内各地域的严冬会使机场环境温度下降到 $-40^{\circ}\text{C}$ 以下，在这种环境下要求金属构件或橡胶轮胎不产生脆化现象。液体火箭使用液氧(沸点为 $-183^{\circ}\text{C}$ )和液氢(沸点为 $-253^{\circ}\text{C}$ )作推进剂，这为材料提出了更严峻的环境条件。部分金属材料和绝大多数高分子材料在这种条件下都会变脆。通过发展或选择合适的材料，如纯铝和铝合金、钛合金、低温钢、聚四氟乙烯、聚酰亚胺和全氟聚醚等，才能解决超低温下结构承受载荷的能力和密封等问题。

### 3. 耐老化和耐腐蚀

各种介质和大气环境对材料的作用表现为腐蚀和老化。航空航天材料接触的介质是飞机用燃料(如汽油、煤油)、火箭用推进剂(如浓硝酸、四氧化二氮、肼类)和各种润滑剂、液压油等。其中多数对金属和非金属材料都有强烈的腐蚀作用或溶胀作用。在大气中受太阳的辐照、风雨的侵蚀以及地下潮湿环境中长期贮存时产生的霉菌会加速高分子材料的老化过程。耐腐蚀性能、抗老化性能、抗霉菌性能是航空航天材料应该具备的良好特性。

### 4. 适应空间环境

空间环境对材料的作用主要表现为高真空( $1.33 \times 10^{-10}\text{Pa}$ )和宇宙射线辐照的影响。金属材料在高真空下互相接触时，由于表面被高真空环境所净化而加速了分子扩散过程，出现“冷焊”现象；非金属材料在高真空和宇宙射线辐照下会加速挥发和老化，有时这种现象会使光学镜头因挥发物沉积而被污染，密封结构因老化而失效。航天材料一般是通过地面模拟试验来选择和发展的，以求适应于空间环境。

### 5. 寿命和安全

为了减轻飞行器的结构质量，选取尽可能小的安全余量而达到绝对可靠的安全寿命，被认为是飞行器设计的奋斗目标。对于导弹或运载火箭等短时间一次使用的飞行器，人们力求把材料性能发挥到极限程度。为了充分利用材料强度并保证安全，对于金属材料已经使用“损伤容限设计原则”。这就要求材料不但具有高的比强度，而且还要有高的断裂韧性。在模拟使用的条件下测定出材料的裂纹起始寿命和裂纹的扩展速率等数据，并计算出允许的裂纹长度和相应的寿命，以此作为设计、生产和使用的重要依据。对于有机非金属材料则要求进行自然老化和人工加速老化试验，确定其寿命的保险期。复合材料的破损模式、寿命和安全也是一项重要的研究课题。

## 1.1.4 航空材料特殊性

航空材料是研制生产航空产品的物质保障，与航空技术关系极为密切，具有以下特殊性。

### 1. 轻质高强、高温耐蚀

航空产品特殊的工作环境对航空材料提出“轻质高强、高温耐蚀”的特殊要求。航空工业有一句口号叫做“为每一克减重而奋斗”，反映了减重对于航空产品的重大经济意义(表1-1)。而且材料减重对飞机减重的贡献也越来越大，所以轻质高强是航空材料必须满足的首要性能要求。“高温耐蚀”的“高温”是指航空材料要能耐受较高的工作温度。对于机身



材料, 气动力加热效应使机身表面温度升高, 需要结构材料具有好的高温强度; 对于发动机材料, 要求涡轮盘和涡轮叶片材料要有好的高温强度和耐高温腐蚀性能。“耐蚀”是指航空材料要有优良的抗腐蚀, 主要是指抗应力腐蚀、腐蚀疲劳的能力。

表 1-1 飞行器结构减重带来的效益(2003 年数据)

机种	小型民用飞机	直升机	先进战斗机	商用运输机	超音速与高超音速运输机	航天飞机
美元/磅	50	300	400	800	3000	30000

## 2. 高的质量要求

航空器是技术密集、高集成度的复杂产品, 只有采用质地优良的航空材料才能制造出安全可靠、性能优良的飞机和发动机。航空产品的多样性和小批量生产, 导致了航空材料研制和生产上的多品种、多规格、小批量、技术质量要求高等特点。

## 3. 低成本航空材料

新型号的先进飞机价格不断攀升, 航空技术领先的国家和地区都先后对航空产品提出了“买得起”的要求。而材料在航空产品的成本和价格构成中占有相当份额, 所以科学地选材和努力发展低成本材料技术是航空材料发展的重要方向。

# 1.2 航空材料发展与应用

航空材料范围较广, 包括结构材料、非结构材料、发动机材料和涂料。其中飞机结构材料和发动机材料是最重要的航空材料, 本节详细介绍了飞机结构材料和航空发动机材料的演变。

## 1.2.1 飞机结构材料演变

飞机结构材料具有高的比强度和比刚度, 为减轻飞机的结构质量, 改善飞行性能或增加经济效益, 还应具有良好的可加工性, 便于制成所需要的零件。迄今为止, 飞机结构材料的发展经历了 4 个发展阶段:

(1) 木材时代: 早期飞机结构以木材、蒙布、金属丝绑扎而成(图 1-4), 后来又发展为木材与金属的混合结构。如莱特兄弟制造的世界第一架动力飞机“飞行者 1 号”。这是一架以轻质木料为骨架、帆布为蒙皮的双翼机。其中木材占 47%, 钢占 35%, 布占 18%, 飞机的飞行速度只有 16km/h。木质材料具有以下缺点: 很难做到强度、重量、性能上的最佳, 而且木质材料吸湿性强、易燃、易腐蚀。

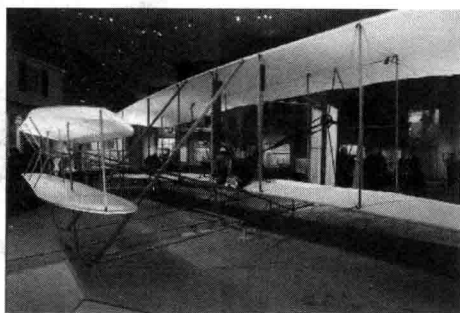


图 1-4 飞行者 1 号(复制)

(2) 铝合金时代: 1906 年德国冶金学家发明了可以时效强化的硬铝, 使制造全金属结构的飞机成为可能。20 世纪 30 年代, 随着铝合金材料发展, 全金属承力蒙皮逐渐成为普遍的结构形式(图 1-5)。40 年代出现的全金属结构飞机的承载能力已大大增加, 飞行速度超过了 600km/h。